University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

The Effects of Signaling Compounds on Leaf Senescence Induction and Assimilate Remobilization in Potatoes (*Solanum tuberosum* L.)

Mojtaba Hosseinian[1] | Mohammad Kafi[2]✉ | Jafar Nabati[3] | Armin Oskoueian[4]

1. Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: hosseinian13@um.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: m.kafi@um.ac.ir
3. Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: jafarnabati@um.ac.ir
4. Khusha Parvaran Zistfannavar (DAYAN), Jahad Street 4th, Agricultural Biotechnology Research Center, Mashhad, Iran. E-mail: armin.oskoueian@alumni.um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: September 08, 2024
Received in revised form: October 09, 2024
Accepted: October 25, 2024
Published online: June 22, 2025

Keywords:
Fontane,
leaf senescence,
potassium,
signaling compounds,
tuber yield.

ABSTRACT

This study was conducted in 2021 at the research farm of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, using a split-plot design based on a randomized complete block design with three replications. The effects of signaling compounds on leaf senescence induction and assimilate remobilization in potatoes were investigated. The treatments included different spraying frequencies (once, twice, and three times) as the main plot, and signaling compounds (control, potassium silicate, monopotassium phosphate, nitric oxide, hydrogen peroxide, EDTA, and ethephon) as the sub plots. The results indicated that monopotassium phosphate, potassium silicate, and EDTA increased the total tuber yield by 60%, 45%, and 40%, tuber starch content by 19%, 26%, and 17%, and tuber dry weight by 14%, 19%, and 13% compared to control, respectively. Regarding leaf senescence induction, these compounds increased hydrogen peroxide levels by 50%, 18%, and 75%, and decreased leaf photosynthetic pigment content by 33%, 28%, and 37% compared to the control, leading to cell membrane degradation and accelerated leaf senescence. These results suggest that the targeted use of signaling compounds, especially potassium containing compounds in the final growth stages, can serve as an effective method to optimize potato yield and quality through more efficient allocation of photosynthetic materials to the tubers.

Cite this article: Hosseinian, M., Kafi, M., Nabati, J., & Oskoueian, A. (2025). The effects of signaling compounds on leaf senescence induction and assimilate remobilization in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, *56*(2), 91-103. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.382073.655100.

© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2024.382073.655100

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۸۰۸۲

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

تأثیر کاربرد ترکیبات پیام‌رسان، بر فرآیند القای پیری برگ و انتقال مجدد آسیمیلات‌ها در سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)

مجتبی حسینیان[۱] | محمد کافی[۲]✉ | جعفر نباتی[۳] | آرمین اسکوئیان[۴]

۱. گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: hosseinian13@um.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: m.kafi@um.ac.ir

۳. گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: jafarnabati@um.ac.ir

۴. شرکت دانش‌بنیان خوشه‌پروران زیست‌فناور، خیابان جهاد ۴- ساختمان مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی کشاورزی، مشهد، ایران. رایانامه: armin.oskoueian@alumni.um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
پتاسیم،
پیری برگ،
ترکیبات پیام‌رسان،
عملکرد غده،
فونتانه.

چکیده

این مطالعه در سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد با هدف بررسی اثر پیام‌رسان‌ها بر القای پیری برگ و انتقال مجدد در سیب‌زمینی به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل تعداد دفعات محلول‌پاشی ترکیبات (یک ، دو و سه مرحله) به‌عنوان عامل اصلی و ترکیبات پیام‌رسان (شاهد، سیلیکات پتاسیم، مونوپتاسیم فسفات، نیتریک اکسید، پراکسید هیدروژن، اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید (EDTA) و اتفون) به‌عنوان عامل فرعی بودند. نتایج نشان داد که مونوپتاسیم فسفات، سیلیکات پتاسیم و EDTA از نظر عملکرد کمی و کیفی به‌ترتیب باعث افزایش ۶۰، ۴۵ و ۴۰ درصدی عملکرد کل غده، ۱۹، ۲۶ و ۱۷ درصدی نشاسته غده و ۱۴، ۱۹ و ۱۳ درصدی وزن خشک غده نسبت به شاهد شدند. هم‌چنین سه ترکیب بالا از نظر القای پیری برگ باعث افزایش ۵۰، ۱۸ و ۷۵ درصدی سطح پراکسید هیدروژن و کاهش ۳۳، ۲۸ و ۳۷ درصدی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها نسبت به شاهد شدند که به تخریب غشاء سلولی و تسریع پیری برگ‌ها منجر گردید. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از پیام‌رسان‌ها به‌ویژه ترکیبات حاوی پتاسیم در مراحل انتهایی رشد سیب زمینی با تخصیص کارآمدتر مواد فتوسنتزی به غده‌ها، می‌تواند به‌عنوان ابزاری موثر برای بهینه‌سازی عملکرد و کیفیت سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: حسینیان، م.، کافی، م.، نباتی، ج.، و اسکوئیان، آ. (۱۴۰۴). تأثیر کاربرد ترکیبات پیام‌رسان، بر فرآیند القای پیری برگ و انتقال مجدد آسیمیلات‌ها در سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.). *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۲)، ۹۱-۱۰۳.
Doi: 10.22059/ijfcs.2024.382073.655100

© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) به‌عنوان اولین محصول زراعی غیر غله‌ای و چهارمین محصول پرمصرف در دنیا پس از گندم، ذرت و برنج است. این محصول در ایران نیز بسیار پرمصرف بوده و بر اساس آمارنامه سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ وزارت جهاد کشاورزی به میزان ۴/۶۸ میلیون تن در سال تولید شده است (Ministry of Agriculture, 2023). از مهمترین عوامل موثر در عملکرد کمی و کیفی سیب‌زمینی، تاریخ برداشت است. برداشت دیرهنگام سیب‌زمینی به دلایل متعددی مانند تنش‌های دمایی، تغییرات فیزیولوژیکی غده‌ها و توسعه بیماری‌ها منجر به افزایش میزان قند و کاهش کیفیت غده‌ها می‌شود (Stark *et al.*, 2020). از سوی دیگر، برداشت پیش از تکمیل فرآیند پیری برگ‌ها، به دلیل عدم انتقال کامل مواد فتوسنتزی از اندام هوایی به غده‌ها و باقی‌ماندن سبزینگی در برگ‌ها، باعث کاهش عملکرد کمی و کیفیت غده می‌شود (Waxman, 2017).

هماهنگی موثر فرآیند انتقال مواد فتوسنتزی به استولون و تبدیل آن به نشاسته در فرآیند پیری برگ، بر بهره‌وری و کیفیت غده‌ها تأثیر می‌گذارد (Dahal *et al.*, 2019). تسریع پیری برگ می‌تواند راهکار مناسبی برای تسریع و افزایش انتقال مجدد در انتهای فصل رشد سیب‌زمینی باشد. پیری برگ در گیاهان یک فرآیند تنظیم‌شده است که در آن اجزای سلولی تخریب شده و مواد غذایی به سایر قسمت‌های ذخیره‌ای گیاه مانند میوه، دانه، غده و ریشه منتقل می‌شود. این فرآیند پیچیده شامل تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلفی است. سلول‌های برگ در زمان پیری، تحت تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از جمله انتقال چشمگیر ترکیبات متابولیکی از آنابولیسم به کاتابولیسم قرار می‌گیرند. پروتئین‌ها شکسته می‌شوند و اسیدهای آمینه آن‌ها دوباره به سایر قسمت‌های گیاه مانند میوه و دانه‌های درحال رشد یا اندام‌های ذخیره‌ای منتقل می‌شوند (Buchanan-Wollaston, 2007).

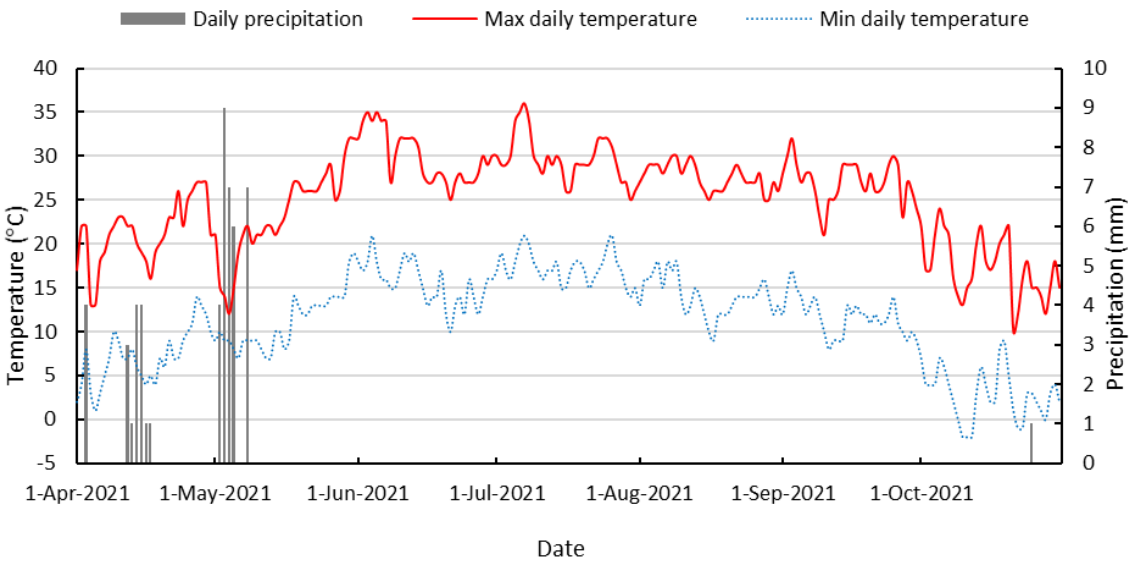
برای تسریع پیری برگ می‌توان از ترکیبات پیام‌رسان گیاهی، از جمله عناصر غذایی، هورمون‌های گیاهی، و گونه‌های فعال اکسیژن استفاده کرد که نقش‌های حیاتی در تنظیم فرآیندهای بیولوژیکی گیاهان ایفا می‌کنند. این ترکیبات می‌توانند بر رشد، توسعه، پیری برگ و فرآیند انتقال مواد فتوسنتزی تأثیر بگذارند (Ding *et al.*, 2022; Binder, 2020).

یکی از پیام‌رسان‌های موثر در انتقال مواد فتوسنتزی در گیاهان، عنصر پتاسیم است. پتاسیم بر تعدادی از آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز، متابولیسم کربوهیدرات‌ها، ساخت پروتئین و کمک به انتقال کربوهیدارت‌ها از برگ به غده موثر بوده و به افزایش اندازه غده‌ها کمک می‌کند (Wang *et al.*, 2018). استفاده از پتاسیم به‌طور قابل توجهی اندازه غده سیب‌زمینی را افزایش می‌دهد و از این طریق باعث افزایش عملکرد نهایی می‌شود (Bhattarai & Swarnimam, 2016; Singh & Lal, 2012). اهمیت پتاسیم در کیفیت سیب‌زمینی را می‌توان به نقش آن در بهبود فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی و همچنین افزایش تبدیل کربوهیدرات‌ها به نشاسته و پروتئین نسبت داد (Koch *et al.*, 2019).

مطالعات مختلفی برای ایجاد تاخیر در پیری برگ انجام شده است؛ درحالی‌که آزمایش‌های انجام‌شده با هدف تسریع پیری برگ‌ها بسیار محدود هستند. هدف این مطالعه بررسی اثرات ترکیبات مختلف پیام‌رسان بر انتقال مجدد و تأثیر آن‌ها بر القاء و تسریع پیری برگ در انتهای فصل رشد و صفات کیفی غده سیب‌زمینی رقم فونتانه بوده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

برای ارزیابی تاثیر ترکیبات پیام‌رسان بر انتقال مجدد و القای پیری برگ در رقم فونتانه سیب‌زمینی، آزمایشی در سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (با عرض جغرافیایی ۳۶/۱۵ و طول جغرافیایی ۵۹/۳۶ و ارتفاع از سطح دریا ۹۸۵ متر) انجام شد. وضعیت دما و بارندگی محل اجرای آزمایش که در فاصله دو کیلومتری ایستگاه سینوپتیک مشهد است در بازه فصل رشد سیب‌زمینی در شکل ۱ آورده شده است (Openweathermap, 2021).



شکل ۱. پارامترهای مهم دما و بارندگی در بازه فصل رشد سیب‌زمینی در مشهد.

۲-۱. طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خردشده و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش، اثر محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان و تعداد دفعات محلول‌پاشی، بر انتقال مجدد و تأثیر آن‌ها بر القاء و تسریع پیری برگ در انتهای فصل رشد سیب‌زمینی مورد مطالعه قرار گرفت. تیمارهای مورد مطالعه شامل تعداد دفعات محلول‌پاشی ترکیبات (یک، دو و سه مرحله) به‌عنوان عامل اصلی و محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان (شاهد محلول‌پاشی با آب (Control)، سیلیکات پتاسیم (Psi) [۱]، مونوپتاسیم فسفات (MPPh) [۲]، نیتریک‌اکسید (NO) [۳]، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) [۴]، EDTA و اتفون (Eth) [۵]) به‌عنوان عامل فرعی بودند.

اندازه هر کرت با مساحت ۱۵ متر مربع شامل پنج متر طول و سه متر عرض، چهار ردیف کشت با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر و به صورت دو ردیفه زیگزاگ با فاصله روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر بود (تراکم ۸/۸ بوته در متر مربع). بین کرت‌ها نیز یک و نیم متر فاصله (یک ردیف کاشت‌نشده) به‌عنوان حاشیه کرت‌ها در نظر گرفته شد.

در این آزمایش از رقم فونتانه به منظور کاشت استفاده شد. به‌طور عمومی، خصوصیات رقم فونتانه سیب‌زمینی شامل گروه رسیدگی نیمه‌زودرس، دوره خواب کوتاه، ماده خشک ۲۳/۲ درصد و عملکرد بالا است (AgriCo, 2023). عملیات کاشت در تاریخ هفتم خرداد (تاریخ کاشت متداول سیب‌زمینی در مشهد) پس از عملیات آماده‌سازی زمین انجام و پس از آن آبیاری با سیستم قطره‌ای با حجم و فواصل مورد نیاز انجام شد.

ترکیبات پیام‌رسان با توجه به تیمار تعداد دفعات محلول‌پاشی، در یک مرحله (۱۰ روز بعد از گلدهی)، دو مرحله (۱۰ روز و ۲۰ روز بعد از گلدهی) و سه مرحله (۱۰ روز، ۲۰ روز و ۳۰ روز بعد از گلدهی) در طول فصل رشد به‌صورت محلول‌پاشی روی سطح برگ اعمال شد. غلظت مورد استفاده سیلیکات پتاسیم دو لیتر در هزار لیتر آب، مونوپتاسیم فسفات یک لیتر در

1 . Potassium silicate
2. Monopotassium phosphate
3 . Nitric oxide
4 . Hydrogen peroxide
5. Ethephon

هزار لیتر آب، نیتریک‌اکسید ۴۳ میکرومولار، پراکسید هیدروژن پنج میکرومولار، EDTA پنج کیلوگرم در هزار لیتر آب و اتفون ۱۴۶ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد.

۲-۲. صفات مورد مطالعه

در این مطالعه صفات فیزیولوژیکی، صفات عملکردی و صفات کیفی غده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین صفات فیزیولوژیک، یک هفته پس از آخرین مرتبه محلول‌پاشی نمونه‌گیری از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته انجام شد. صفات عملکرد کمی و کیفی غده‌ها نیز در انتهای فصل رشد سیب‌زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۳. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی برگ از روش در و همکاران (Dere *et al.*, 1998) استفاده شد؛ به‌طوری‌که رنگ‌دانه‌ها با استفاده از استون ۱۰۰ درصد (C_3H_6O) استخراج شد. سپس میزان جذب در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۲ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (CECIL 2021, UK) انجام و غلظت رنگ‌دانه‌های برگ محاسبه شد.

محاسبات کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها با استفاده از معادله‌های ۵ تا ۸ انجام شد:

5. Chlorophyll a = 11.75 A662 – 2.350 A645
6. Chlorophyll b = 18.61 A645 – 3.960 A662
7. Carotenoids = 1000 A470 – 2.270 Chla – 81.4 Chlb/227
8. Total pigments = Chla + Chlb + Carotenoids

۲-۴. فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز (APX)

به‌منظور ارزیابی فعالیت آنزیمی، ۱۰۰ میلی‌گرم برگ تازه در ازت مایع پودر شد. یک میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (K_3PO_4) ۰/۱ مولار با اسیدیته ۷/۸، حاوی EDTA یک میلی‌مولار به آن اضافه شد. مواد نامحلول توسط سانتریفیوژ یخچال‌دار با ۱۲۰۰۰ دور به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد جدا شد و محلول بالایی به عنوان منبع استخراج آنزیم‌ها استفاده شد. فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز (APX) مطابق روش یاماگوچی و همکاران (۱۹۹۵) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم (K_3PO_4) ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) یک میلی‌مولار و آسکوربات ($C_6H_7O_6$) ۰/۵ میلی‌مولار بود. فعالیت آسکوربات‌پراکسیداز وابسته به کاهش میزان جذب در ۲۹۰ نانومتر اکسیداسیون آسکوربات بود (ضریب خاموشی ۲/۸ میلی‌مولار در سانتی‌متر).

۲-۵. پراکسید هیدروژن (H_2O_2)

به‌منظور اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن ۱۰۰ میلی‌گرم نمونه با ۵۰۰ میکرولیتر تریکلرواستیک‌اسید (TCA) ۰/۱ درصد هموژنایز (درون یخ) و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه با ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از محلول رویی جدا و به‌طور هم‌زمان به آن ۴۰۰ میکرولیتر TCA (۰/۱ درصد) و ۸۰۰ میکرولیتر یدید پتاسیم (KI) یک مولار اضافه شد. نمونه آماده‌شده به‌مدت یک ساعت در مکان تاریک تکان داده شده و در نهایت در طول موج ۳۹۰ نانومتر قرائت انجام و مطابق استاندارد پراکسید هیدروژن، خروجی نهایی آماده شد. لازم به ذکر است تمام مراحل در تاریکی انجام شد.

۲-۶. شاخص سبزینگی برگ (SPAD)

برای اندازه‌گیری شاخص سبزینگی برگ در اواسط روز (بین ساعت‌های ۱۰ تا ۱۲) در یک آسمان صاف بدون ابر و با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (Konica minola SPAD-502, Japan) اقدام شد. برای این کار در هر کرت، از برگ پنج بوته نمونه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به عنوان عدد اسپد آن کرت در نظر گرفته شد.

۲-۷. درصد نشت الکترولیت‌ها

برای تعیین درصد نشت الکترولیت‌ها، نمونه‌های برگی از هر تیمار درون فالکون‌هایی با آب دو بار تقطیر قرار داده شد. سپس فالکون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفته و در مرحله بعد میزان هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از دستگاه رسانایی‌سنج الکتریکی (Jenway 4510, UK) اندازه‌گیری و به‌عنوان EC_1 ثبت شد. به‌منظور تعیین میزان کل

نشت الکترولیت‌ها، فالکون‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۲ اتمسفر نگهداری شد. سپس فالکون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفته و دوباره هدایت الکتریکی آن‌ها تحت عنوان EC_2 اندازه‌گیری و ثبت شد؛ درنهایت درصد نشت الکترولیت با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد (Jambunathan, 2010).

4. Electrolyte Leakage (%) = $(EC_1/EC_2) \times 100$

۲-۸. عملکرد غده

برای محاسبه عملکرد کل غده و عملکرد غده بازارپسند، یک متر مربع از هر کرت آزمایشی برداشت شد. غده‌ها شسته و وزن‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری غده‌های بازارپسند، غده‌هایی که حداقل قطر ۳۰ میلیمتر داشتند جداسازی، شمارش و وزن‌گیری شدند.

۲-۹. وزن مخصوص غده

به‌منظور تعیین وزن مخصوص غده‌ها (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، مقدار دو کیلوگرم غده به‌صورت تصادفی از هر تیمار جدا شد. غده‌ها شستشو و رطوبت‌گیری شده و در یک توری پلاستیکی قرار داده شدند. با استفاده از ترازوی دیجیتال آویز (Weihang portable)، وزن دقیق غده‌ها به عنوان وزن بیرون آب ثبت شد. سپس غده‌ها با توری به درون آب منتقل شده و وزن آن‌ها درون آب نیز ثبت شد. با استفاده از معادله ۱، وزن مخصوص غده‌ها تعیین شد (Kleinkopf *et al.*, 1995).

1. Specific gravity (gcm^{-3}) = Weight in air / (Weight in air - Weight in water)

۲-۱۰. درصد ماده خشک غده

به‌منظور محاسبه درصد ماده خشک غده‌ها، وزن تر غده‌ها اندازه‌گیری شده و سپس غده‌ها برش خورده و به مدت پنج روز در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. وزن خشک غده‌ها اندازه‌گیری و درصد ماده خشک با استفاده از معادله ۲ تعیین شد.

2. Dry mater (%) = ((tuber dry weight) / (tuber fresh weight)) × 100

۲-۱۱. درصد نشاسته غده

درصد نشاسته غده‌ها با استفاده از معادله ۳ تعیین شد (AOAC, 1980).

3. Starch content (%) = 17.55 + 0.891 (tuber dry weight % - 24.182)

۲-۱۲. محاسبات آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد و رسم نمودارها در محیط نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. رنگدانه‌های فتوسنتزی

نوع ترکیبات پیام‌رسان باعث تغییرات معنی‌دار در مقادیر کلروفیل a، کاروتنوئیدها و کلروفیل کل شدند (جدول ۱). همچنین، دفعات محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان تأثیر معنی‌داری بر مقادیر کلروفیل a و کلروفیل کل نشان داد (جدول ۱). استفاده از ترکیبات پیام‌رسان باعث کاهش معنی‌دار میزان کلروفیل a نسبت به تیمار بدون محلول‌پاشی شدند. بیشترین مقدار این صفت در تیمار شاهد مشاهده شد و محلول‌پاشی ترکیبات مونوپتاسیم فسفات، سیلیکات پتاسیم و EDTA به‌ترتیب باعث کاهش ۴۵، ۳۱ و ۳۰ درصدی کلروفیل a نسبت به شاهد شدند (جدول ۲). بیشترین مقدار کاروتنوئید در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۲). محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان به‌خصوص ترکیبات مونوپتاسیم فسفات، EDTA، سیلیکات پتاسیم و اتفون به‌ترتیب منجر به کاهش ۵۵، ۵۶، ۵۰ و ۳۹ درصدی میزان این صفت نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی شدند (جدول ۲).

محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان و افزایش دفعات محلول‌پاشی باعث کاهش معنی‌دار میزان کلروفیل کل شد (جدول ۱). بیشترین مقدار این صفت در تیمار شاهد با یک مرحله محلول‌پاشی مشاهده شد. افزایش دفعات محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان به دو و سه مرحله به‌ترتیب باعث کاهش ۱۱ و ۲۱ درصدی این صفت شد. در بین ترکیبات پیام‌رسان، محلول‌پاشی EDTA، مونوپتاسیم فسفات و سیلیکات پتاسیم به‌ترتیب کمترین میزان کلروفیل کل را حاصل کردند. میزان این صفت در ترکیبات ذکر شده به‌ترتیب ۳۷، ۳۳ و ۲۸ درصد کمتر از تیمار شاهد بود (جدول ۲).

جدول ۱. تجزیه واریانس صفات رنگدانه‌های فتوسنتزی سیب‌زمینی رقم فونتانه تحت تیمارهای مختلف ترکیبات پیام‌رسان.

S.O.V	df	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Total Pigments
Block	2	0.00019^{ns}	5.3E-5^{ns}	2.7E-5^{ns}	0.001^{ns}
SF	2	0.001*	0.00047^{ns}	0.00011^{ns}	0.004**
Main Error	4	2.5E-5	0.00025	5.8E-5	0.00018
SC	6	0.001**	0.001^{ns}	0.00013*	0.003**
SF ×SC	12	0.00018^{ns}	0.00037^{ns}	3.6E-5^{ns}	0.00029^{ns}
Error	36	0.00027	0.00033	4.5E-5	0.001
C.V. (%)	-	33	36	55	20

**، * و ^{ns} به‌ترتیب بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشند. SF و SC به‌ترتیب نشانگر تعداد پاشش و ترکیب پیام‌رسان است.

جدول ۲. مقایسه میانگین صفات رنگدانه‌های فتوسنتزی سیب‌زمینی رقم فونتانه تحت تیمارهای مختلف ترکیبات پیام‌رسان.

Treatment		Chlorophyll a (mg/gfw)	Carotenoid (mg/gfw)	Total Pigments (mg/gfw)
SF	1	0.056^{a}	0.009	0.126^{a}
	2	0.051^{ab}	0.011	0.112^{b}
	3	0.042^{b}	0.014	0.099^{b}
SC	Control	0.061^{a}	0.018^{a}	0.143^{a}
	PSi	0.042^{bc}	0.009^{b}	0.103^{bcd}
	MPPh	0.033^{c}	0.008^{b}	0.096^{cd}
	NO	0.058^{ab}	0.015^{ab}	0.124^{ab}
	H2O2	0.053^{ab}	0.012^{ab}	0.116^{bc}
	EDTA	0.043^{bc}	0.008^{b}	0.090^{d}
	Eth	0.058^{ab}	0.011^{b}	0.114^{bc}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. SF وSC به‌ترتیب نشانگر تعداد پاشش و ترکیب پیام‌رسان است.

۳-۲. فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز (APX)

استفاده از ترکیبات پیام‌رسان، تاثیر معنی‌داری بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز داشت (جدول ۳). اما دفعات محلول‌پاشی ترکیبات و اثر متقابل آن با ترکیبات پیام‌رسان تاثیر معنی‌داری بر میزان فعالیت این آنزیم نداشت (جدول ۳). بیشترین فعالیت این آنزیم به‌ترتیب در تیمارهای شاهد، پراکسید هیدروژن و نیتریک‌اکسید مشاهده شد. در بین ترکیبات پیام‌رسان، تیمارهای مونوپتاسیم فسفات، سیلیکات پتاسیم و EDTA به‌ترتیب کاهش ۶۵، ۵۹ و ۴۸ درصدی میزان فعالیت آسکوربات‌پراکسیداز را نسبت به شاهد نشان دادند (جدول ۴).

۳-۳. پراکسید هیدروژن (H_2O_2)

نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از ترکیبات پیام‌رسان تأثیر معنی‌داری بر میزان پراکسید هیدروژن برگ داشتند (جدول ۳). علاوه‌براین، دفعات محلول‌پاشی این ترکیبات نیز به‌طور معنی‌داری میزان پراکسید هیدروژن را تغییر داد. در بررسی اثرات ترکیبات مختلف، تیمار EDTA بالاترین میزان پراکسید هیدروژن را با ۷۴ درصد افزایش نسبت به شاهد نشان داد (جدول ۴). همچنین، تیمار پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و مونوپتاسیم فسفات، میزان پراکسید هیدروژن برگ را به‌ترتیب ۷۱

و ۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند (جدول ۴). نیتریک‌اکسید و سیلیکات پتاسیم نیز به‌ترتیب باعث افزایش ۲۶ و ۱۷ درصدی پراکسید هیدروژن نسبت به شاهد شدند (جدول ۴).

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات عملکردی و فیزیولوژیک سیب‌زمینی رقم فونتانه تحت تیمارهای مختلف ترکیبات پیام‌رسان.

S.O.V	df	APX	H2O2	SPAD Unit	Electrolyte Leakage	Tuber Yield	Marketable Tuber Yield	Specific Gravity	Dry Matter %	Starch %
Block	2	4.10^{ns}	0.31^{ns}	12.50^{ns}	16.31^{ns}	44336^{ns}	2736^{ns}	9.90E-5^{ns}	1.99^{ns}	1.61^{ns}
SF	2	6.69^{ns}	1.17**	10.66^{ns}	5.30^{ns}	13940^{ns}	4831^{ns}	7.24E-5^{ns}	14.15*	11.38*
Main Error	4	4.96	0.41	4.99	7.57	56485	15820	0.00029	3.71	2.93
SC	6	21.58**	0.65*	16.63*	124.18**	115095**	115139**	6.41E-5^{ns}	15.98**	12.80**
SF ×SC	12	4.08^{ns}	0.16^{ns}	5.07^{ns}	16.15^{ns}	32223^{ns}	20721^{ns}	0.00012^{ns}	2.19^{ns}	1.69^{ns}
Error	36	5.27	0.20	7.84	21.33	23710	15627	0.00017	2.71	2.17
C.V. (%)	-	56	30	17	7	23	30	1.2	8.6	11

**، * و ^{ns} به‌ترتیب بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشند. SF و SC به‌ترتیب نشانگر تعداد پاشش و ترکیب پیام‌رسان است.

۳-۴. شاخص سبزینگی برگ (SPAD)

براساس نتایج تجزیه واریانس ترکیبات پیام‌رسان به‌طور معنی‌داری بر شاخص سبزینگی برگ تأثیر داشتند (جدول ۳). با این حال، دفعات محلول‌پاشی و اثر متقابل آن با ترکیبات پیام‌رسان تأثیر معنی‌داری بر این صفت نشان ندادند (جدول ۳). کمترین شاخص سبزینگی برگ در تیمارهای EDTA، اتفون، مونوپتاسیم فسفات و سیلیکات پتاسیم مشاهده شد. این ترکیبات به‌ترتیب باعث کاهش ۲۱، ۱۹، ۱۷ و ۱۷ درصدی اسپد نسبت به تیمار شاهد شدند (جدول ۴).

۳-۵. نشت الکترولیت‌ها

استفاده از ترکیبات پیام‌رسان تأثیر معنی‌داری بر درصد نشت الکترولیت غشاء داشت؛ با این حال، تعداد دفعات محلول‌پاشی و اثرات متقابل آن‌ها با ترکیبات پیام‌رسان تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشتند (جدول ۳). مقایسات میانگین‌ها نشان داد که تیمار سیلیکات پتاسیم نسبت به شاهد ۱۴ درصد نشت الکترولیت بیشتری ایجاد کرده است (جدول ۴). همچنین تیمارهای EDTA و مونوپتاسیم فسفات نیز به‌ترتیب با نه و سه درصد افزایش نشت الکترولیت نسبت به شاهد، باعث افزایش میزان این صفت شدند (جدول ۴). تیمارهای پراکسید هیدروژن، نیتریک‌اکسید، شاهد و اتفون به‌ترتیب کمترین میزان نشت الکترولیت غشاء را نشان دادند (جدول ۴).

۳-۶. عملکرد غده

براساس نتایج تجزیه واریانس تعداد دفعات محلول‌پاشی و همچنین اثر متقابل آن با ترکیبات پیام‌رسان، بر عملکرد کل غده و عملکرد غده بازارپسند تاثیر معنی‌دار نداشت؛ اما محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان بر صفات ذکر شده اثر معنی‌داری داشت (جدول ۳). کمترین عملکرد غده در تیمار شاهد مشاهده شد. محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان به‌ویژه مونوپتاسیم فسفات، سیلیکات پتاسیم و EDTA به‌ترتیب باعث افزایش ۶۰ ، ۴۵ و ۴۰ درصدی این صفت نسبت به تیمار شاهد شدند (جدول ۴). در صفت عملکرد غده بازارپسند نیز محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان باعث افزایش میزان این صفت نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی شدند. تیمارهای مونوپتاسیم فسفات، سیلیکات پتاسیم و EDTA به‌ترتیب باعث افزایش ۹۳، ۶۴، ۴۵ درصدی عملکرد غده بازارپسند نسبت به شاهد شدند (جدول ۴).

۳-۷. وزن مخصوص غده

اثر ترکیبات پیام‌رسان، دفعات محلول‌پاشی آن‌ها و همچنین اثر متقابل آن‌ها تاثیری بر میزان وزن مخصوص غده‌های سیب‌زمینی نداشت (جدول ۳).

۳-۸. درصد ماده خشک غده

نتایج نشان داد که استفاده از ترکیبات پیام‌رسان و دفعات محلول‌پاشی آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر درصد ماده خشک غده‌های سیب‌زمینی داشتند (جدول ۳). محلول‌پاشی دو و سه مرحله‌ای ترکیبات پیام‌رسان به‌ترتیب هفت و هشت درصد افزایش ماده خشک نسبت به یک مرحله محلول‌پاشی حاصل کردند (جدول ۴). در مورد ترکیبات پیام‌رسان، تیمار سیلیکات پتاسیم بیشترین ماده خشک غده (۱۹ درصد افزایش نسبت به شاهد) را نشان داد (جدول ۴). پس از آن تیمارهای مونوپتاسیم فسفات و EDTA نیز به‌ترتیب باعث ایجاد اختلاف ۱۴ و ۱۳ درصدی افزایش نسبت به شاهد شدند. تیمارهای پراکسید هیدروژن، اتفون و شاهد کمترین درصد ماده خشک غده را داشتند (جدول ۴).

۳-۹. درصد نشاسته غده

استفاده از ترکیبات پیام‌رسان و تعداد دفعات محلول‌پاشی آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر درصد نشاسته غده‌های سیب‌زمینی داشتند (جدول ۳). نتایج نشان داد که کاربرد ترکیبات پیام‌رسان منجر به افزایش درصد نشاسته نسبت به عدم استفاده از آن‌ها شد (جدول ۴). کمترین مقدار نشاسته در تیمار شاهد و بیشترین مقدار در تیمارهای سیلیکات پتاسیم، مونوپتاسیم فسفات و EDTA به‌ترتیب با افزایش ۲۶، ۱۹ و ۱۷ درصدی نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول ۴).

۳-۱۰. بحث

در این پژوهش استفاده از ترکیبات پیام‌رسان حاوی پتاسیم به‌ویژه سیلیکات پتاسیم و مونوپتاسیم فسفات باعث القای پیری برگ‌ها و انتقال مجدد در سیب‌زمینی رقم فونتانه شدند. پتاسیم یک ماده پرمصرف ضروری است که بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف گیاهان از جمله فعال‌شدن آنزیم‌ها، فتوسنتز، افزایش انتقال قند و نشاسته و تنظیم آب سلول تأثیر می‌گذارد. سطوح کافی پتاسیم به حفظ تورژسانس سلولی و سلامت کلی گیاه کمک می‌کند که می‌تواند پیری را به تاخیر بیندازد؛ با این حال، زمانی که پتاسیم در اواخر فصل رشد استفاده شود نتایج متفاوتی حاصل شده و پیری تسریع می‌شود (Wang *et al.*, 2013). مطالعات مختلف، پاسخ‌های متفاوتی را به کاربردهای پتاسیم در اواخر فصل در گیاهان مختلف نشان داده‌اند. به‌عنوان مثال در گندم، استفاده از پتاسیم در انتهای فصل رشد برخی صفات فیزیولوژیکی را افزایش و از طرفی منجر به تسریع پیری برگ شد (Gu *et al.*, 2021). همچنین در پنبه زمان و روش مصرف پتاسیم به‌طور قابل توجهی بر پیری برگ تأثیر گذاشته و کاربرد آخر فصل آن منجر به پیری سریع‌تر برگ‌ها می‌شود (Yang *et al.*, 2017).

در این آزمایش، استفاده از ترکیبات پیام‌رسان ازجمله سیلیکات پتاسیم و مونوپتاسیم فسفات باعث کاهش محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل شد. از آنجایی‌که گیاه در انتهای فصل، مواد و عناصر غذایی را به اندام‌های ذخیره‌ای اختصاص می‌دهد، کاربرد پتاسیم اضافی می‌تواند سرعت حرکت این مواد را افزایش دهد. با این کار، مواد غذایی از برگ‌ها تخلیه شده و باعث زردشدن و پیری آن‌ها می‌شود (Hasanuzzaman *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2020). با پیر شدن برگ‌ها، محتوای کلروفیل به میزان قابل توجهی کاهش یافته و باعث تغییر رنگ برگ می‌شود. تجزیه کلروفیل یکی از اولین و قابل مشاهده‌ترین نشانه‌های پیری برگ است (Zhao *et al.*, 2021). در طول پیری برگ، کلروفیل a و b با سرعت‌های متفاوتی تجزیه می‌شوند و محتوای آن‌ها کاهش پیدا می‌کند که امکان تغییر تدریجی رنگ برگ از سبز به زرد را با کاهش محتوای کلروفیل فراهم می‌کند (Vangelisti *et al.*, 2020). این فرآیند برای انتقال مجدد مواد غذایی گیاه بسیار مهم است. همبستگی منفی بین وزن خشک و نشاسته غده با میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، نشان از انتقال مواد فتوسنتزی به غده‌ها و تبدیل آن‌ها به نشاسته دارد (جدول ۵).

با اینکه محلول‌پاشی ترکیبات پیام‌رسان باعث کاهش محتوای کاروتنوئیدها شدند، اما با افزایش دفعات محلول‌پاشی محتوای آنها افزایش پیدا کرد که با افزایش پیری برگ قابل توجیه است. کاروتنوئیدها نسبت به کلروفیل دیرتر تجزیه می‌شوند. با کاهش محتوای کلروفیل، غلظت نسبی کاروتنوئیدها می‌تواند افزایش یابد که ممکن است به رنگ‌های زرد و نارنجی در برگ‌های پیر مشاهده شود. در برخی از مطالعات مشخص شده که کاروتنوئیدها حتی با کاهش قابل توجه سطح کلروفیل، نسبتاً پایدار می‌مانند (Lichtenthaler & Babani., 2022).

افزایش سطح پراکسید هیدروژن در این پژوهش در نتیجه استفاده از ترکیبات پیام‌رسان از جمله سیلیکات پتاسیم و مونوپتاسیم فسفات احتمالا به دلیل تنش اکسیداتیو ناشی از محلول‌پاشی آن‌ها در انتهای فصل رشد بوده است که باعث تخریب غشاءها و افزایش درصد نشت الکترولیت شده است. همچنین در این مطالعه همبستگی منفی معنی‌داری بین میزان پراکسید هیدروژن با رنگدانه‌های فتوسنتزی مشاهده شد (جدول ۵). محلول‌پاشی ترکیبات پتاسیمی در انتهای فصل، باعث پیام‌رسانی تنش و تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. این رادیکال‌های آزاد نقش مهمی در تخریب اجزای سلولی از جمله کلروفیل و القاء پیری برگ دارند (Hu *et al.*, 2016; Sarwar *et al.*, 2022). از طرفی، این ROS[1]ها به عنوان مولکول پیام‌رسان برای تنظیم مسیرهای پیری برگ عمل می‌کنند (Zhao *et al.*, 2022). با پیشرفت پیری برگ، تعادل بین تولید ROS و فعالیت آنتی‌اکسیدانی تغییر می‌کند. افزایش ROS اغلب با کاهش فعالیت این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان همراه است که منجر به افزایش تنش اکسیداتیو می‌شود (Khanna-Chopra. 2012; Honig *et al.*, 2018). در این پژوهش کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز احتمالا به دلیل افزایش سطح ROSهایی مانند پراکسید هیدروژن و کاهش فعالیت سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی در اثر القای پیری برگ در نتیجه کاربرد ترکیبات پیام‌رسان سیلیکات پتاسیم و مونوپتاسیم فسفات است.

افزایش عملکرد غده سیب‌زمینی در تیمارهای کاربرد ترکیبات پیام‌رسان حاوی پتاسیم نسبت به سایر ترکیبات بیشتر بود. پتاسیم آنزیم‌های مختلف درگیر در متابولیسم کربوهیدارت‌ها را فعال می‌کند که به تبدیل قندهای ساده به اشکال پیچیده‌تر آن مثل نشاسته کمک می‌کند. این فرآیند برای تجمع کربوهیدرات‌ها در غده حیاتی است که به‌طور مستقیم بر اندازه و عملکرد غده‌ها تاثیر می‌گذارد (Torabian *et al.*, 2021). نقش پتاسیم در رشد گیاه سیب‌زمینی، بیوشیمی ساخت نشاسته و کمیت و کیفیت غده به‌خوبی اثبات شده است (Karam *et al.*, 2011). پتاسیم باعث تسهیل انتقال مواد فتوسنتزی به غده‌های سیب‌زمینی می‌شود که این موضوع باعث افزایش اندازه، زیست‌توده و عملکرد غده می‌شود (Moinuddin *at al*, 2005). همچنین این عنصر باعث افزایش سرعت و مدت زمان حجیم‌شدن غده‌ها در سیب‌زمینی می‌شود (Malik & Gosh, 2002). باتوجه به نقش پتاسیم در تسهیل انتقال مواد فتوسنتزی از برگ به غده، افزایش عملکرد غده در متر مربع و عملکرد غده بازارپسند در نتیجه کاربرد سیلیکات پتاسیم و مونوپتاسیم فسفات به دلیل محتوای پتاسیم آن‌ها قابل توجیه است. تیمار EDTA نیز از نظر عملکردی در سطح بالایی قرار داشت. این ترکیب احتمالا به دلیل محتوای اتیلن آن و همچنین ایجاد تنش اکسیداتیو و تخریب غشاءها باعث القاء پیری در برگ‌ها، زردی و تسریع انتقال مواد به اندام‌های ذخیره‌ای گیاه می‌شود. Kamal *et al*. (2023) گزارش کردند که افزایش غلظت EDTA باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون غشاءهای سلولی و تجزیه کلروفیل‌ها می‌شود. نتایج مشابه در آزمایش ما نیز با توجه به غلظت بالای مصرف EDTA (5000 ppm) با همین مکانیسم اثر قابل توجیه است.

وزن خشک غده و درصد نشاسته غده همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد غده داشتند (جدول ۵). در مطالعه‌ای استفاده از ترکیبات پیام‌رسان پتاسیمی از جمله مونوپتاسیم فسفات و سیلیکات پتاسیم باعث بهبود کیفیت سیب‌زمینی از لحاظ درصد نشاسته، وزن مخصوص غده، درصد ماده خشک و کیفیت پخت شد (Westermann *et al.*, 1994). برخی از مطالعات نیز به‌طور مشابه گزارش کردند که پتاسیم با فعال‌کردن آنزیم ساخت نشاسته، درصد ماده خشک و محتوای نشاسته را بهبود می‌بخشد و همبستگی مثبتی بین این صفات وجود دارد (Feltran *et al.*, 2004).

1. Reactive oxygen species

جدول ٤. مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیک و عملکردی سیب‌زمینی رقم فونتانه تحت تیمارهای مختلف ترکیبات پیام‌رسان.

Treatment		APX (µmol.min.gfw)	H2O2 (µmol/gfw)	SPAD Unit	Electrolyte Leakage (%)	Tuber Yield (kg.m^{-2})	Marketable Tuber Yield (kg.m^{-2})	Dry Matter (%)	Starch (%)
SF	1	4.32^{a}	1.22^{b}	17.3^{a}	65.3^{a}	6.24^{a}	3.70^{a}	18.2^{b}	12.2^{b}
	2	3.38^{a}	1.45^{ab}	16.4^{a}	65.4^{a}	5.89^{a}	3.52^{a}	19.4^{a}	13.6^{a}
	3	4.39^{a}	1.69^{a}	15.9^{a}	64.5^{a}	5.81^{a}	3.78^{a}	19.7^{a}	13.3^{a}
SC	Control	5.75^{a}	1.02^{c}	19.1^{a}	62.9^{c}	4.70^{d}	2.77^{d}	17.6^{d}	11.7^{d}
	PSi	2.36^{cd}	1.20^{ab}	15.9^{b}	71.4^{a}	6.81^{ab}	4.54^{ab}	21.0^{a}	14.7^{a}
	MPPh	2.04^{d}	1.53^{ab}	15.8^{b}	64.8^{bc}	7.51^{a}	5.34^{a}	20.1^{ab}	13.9^{ab}
	NO	4.86^{ab}	1.29^{bc}	17.9^{ab}	62.2^{c}	5.20^{cd}	2.69^{d}	19.3^{bc}	13.2^{bc}
	H_2O_2	5.63^{a}	1.75^{ab}	16.9^{ab}	61.4^{c}	5.61^{b-d}	3.30^{cd}	18.2^{c}	12.2^{cd}
	EDTA	2.98^{b-d}	1.78^{a}	15.0^{b}	68.8^{ab}	6.57^{a-c}	4.02^{bc}	19.8^{ab}	13.7^{ab}
	Eth	4.60^{a-c}	1.31^{a-c}	15.4^{b}	64.1^{c}	5.45^{cd}	2.99^{cd}	17.6^{d}	11.7^{d}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. SC و SF به‌ترتیب نشانگر تعداد پاشش و ترکیب پیام‌رسان است.

جدول ٥. همبستگی بین صفات مورد مطالعه سیب‌زمینی رقم فونتانه تحت تیمارهای مختلف ترکیبات پیام‌رسان.

	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Total Pigments	APX	H2O2	SPAD Unit	Electrolyte Leakage	Tuber Yield	Marketable Tuber Yield	Tubers Specific Gravity	Dry Matter %	Starch %
Chlorophyll a	1												
Chlorophyll b	-0.184	1											
Carotenoid	0.620**	0.084	1										
Total Pigments	0.686**	0.563**	0.714**	1									
APX	0.326**	0.160	0.283*	0.386**	1								
H2O2	-0.273*	-0.323**	-0.369**	-0.482**	-0.168	1							
SPAD Unit	0.039	0.349**	0.194	0.302*	0.032	-0.349**	1						
Electrolyte Leakage	-0.245	-0.017	-0.238	-0.229	-0.358**	0.157	-0.221	1					
Tuber Yield	-0.265*	-0.044	-0.117	-0.233	-0.422**	-0.022	-0.121	0.182	1				
Marketable Tuber Yield	-0.367**	-0.022	-0.221	-0.310*	-0.369**	0.014	-0.141	0.242	0.826**	1			
Tubers Specific Gravity	0.065	-0.147	0.018	-0.051	0.018	0.110	-0.012	0.096	-0.313*	-0.218	1		
Dry Matter %	-0.285*	-0.127	-0.286*	-0.341**	-0.457**	0.220	-0.121	0.338**	0.276*	0.314*	-0.002	1	
Starch %	-0.288*	-0.127	-0.288*	-0.343**	-0.459**	0.221	-0.120	0.338**	0.274*	0.313*	-0.002	1.000**	1

** و * به‌ترتیب بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشند.

۴. نتیجه‌گیری

در بررسی اثرات ترکیبات پیام‌رسان مختلف بر انتقال مواد فتوسنتزی از برگ به غده و تأثیر آن‌ها بر القاء و تسریع پیری برگ در انتهای فصل رشد و صفات کیفی غده سیب‌زمینی رقم فونتانه، ترکیبات حاوی پتاسیم بیشترین تأثیر را بر انتقال مواد فتوسنتزی از اندام هوایی به غده و القای پیری برگ در سیب‌زمینی دارند. این ترکیبات با القای پیری در برگ‌ها و افزایش انتقال مواد تولیدشده به غده‌های سیب‌زمینی، نه‌تنها به افزایش عملکرد گیاه کمک کرده‌اند، بلکه کیفیت محصول نهایی را نیز ارتقاء داده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیبات پیام‌رسان، به‌ویژه ترکیبات حاوی پتاسیم، در مراحل انتهایی رشد، باعث افزایش سطح گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، افزایش درصد نشت الکترولیت‌ها و کاهش محتوای کلروفیل برگ شده که این امر به تخریب غشاء سلولی و پیری برگ‌ها منجر شده است. همچنین، این ترکیبات منجر به افزایش درصد نشاسته و ماده خشک غده شده‌اند که نشان از افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به غده دارد. از نظر تعداد دفعات محلول‌پاشی نیز، محلول‌پاشی در دو و سه مرحله تأثیر بیشتری بر افزایش ماده خشک، درصد نشاسته و کاهش کلروفیل کل نشان داده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای بهینه‌سازی عملکرد و کیفیت غده‌ها، از محلول‌پاشی در دو یا سه مرحله استفاده شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از ترکیبات پیام‌رسان حاوی پتاسیم در انتهای فصل رشد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم در بهبود عملکرد و کیفیت سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گیرد که می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آینده و توصیه‌های کشاورزی باشد. با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی شرایط استفاده از این ترکیبات و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی به گیاهان وجود دارد. همچنین، در مطالعات آینده لازم است نحوه عمل پیام‌رسان‌ها از نظر مطالعات ژنتیک گیاهی و فیزیولوژی مولکولی به‌طور دقیق‌تر بررسی شود تا تأثیر این ترکیبات در سطح مولکولی و سلولی بهتر درک شود.

۵. منابع

AgriCo. (2023). Fontane overview. AgriCo Potatoes. https://www.agricopotatoes.com/.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1980). *Official Methods of Analysis*. Gaithersburg, Md.

Bhattarai, B., & Swarnima, K.C. (2016). Effect of potassium on quality and yield of potato tubers–A review. *International Journal of Agriculture & Environmental Science*, *3*(6), 7-12.

Buchanan-Wollaston, V. (2007). *Senescence in plants*. eLS. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi, 10.1002/9780470015902.a0020133.

Binder, B.M. (2020). Ethylene signaling in plants. *Journal of Biological Chemistry*, *295*(22), 7710-7725.

Dahal, K., Li, X.Q., Tai, H., Creelman, A., & Bizimungu, B. (2019). Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario–A current overview. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 563.

Dere, S., Gines., T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll a, b and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany*, *22*, 13-17.

Feltran, J.C., Lemos, L.B., & Vieites, R.L. (2004). Technological quality and utilization of potato tubers. *Scientia Agricola*, *61*, 598-603.

Ding, L.N., Li, Y.T., Wu, Y.Z., Li, T., Geng, R., Cao, J., ..., & Tan, X.L. (2022). Plant disease resistance-related signaling pathways: Recent progress and future prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(24), 16200.

Gu, X., Liu, Y., Li, N., Liu, Y., Zhao, D., Wei, B., & Wen, X. (2021). Effects of the foliar application of potassium fertilizer on the grain protein and dough quality of wheat. *Agronomy*, *11*(9), 1749.

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., ..., & Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, *8*(3), 31.

Honig, M., Plíhalová, L., Husičková, A., Nisler, J., & Doležal, K. (2018). Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(12), 4045.

Hu, W., Lv, X., Yang, J., Chen, B., Zhao, W., Meng, Y., ..., & Oosterhuis, D.M. (2016). Effects of potassium deficiency on antioxidant metabolism related to leaf senescence in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Research*, *191*, 139-149.

Jambunathan, N. (2010). Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. *Plant Stress Tolerance: Methods and Protocols*, 291-297.

Kamal, M.A., Perveen, K., Khan, F., Sayyed, R.Z., Hock, O.G., Bhatt, S.C., ... & Qamar, M.O. (2023). Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of *Brassica juncea* L. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1228117.

Karam, F., Massaad, R., Skaf, S., Breidy, J., & Rouphael, Y. (2011). Potato response to potassium application rates and timing under semi-arid conditions. *Advances in Horticultural Science*, *25*(4), 265-268.

Khanna-Chopra, R. (2012). Leaf senescence and abiotic stresses share reactive oxygen species-mediated chloroplast degradation. *Protoplasma*, *249*, 469-481.

Kleinkopf, G.E., Westermann, D.T., Wille, M.J., & Kleinschmidt, G.D. (1987). Specific gravity of Russet Burbank potatoes. *American Potato Journal*, *64*, 579-587.

Koch, M., Busse, M., Naumann, M., Jákli, B., Smit, I., Cakmak, I., & Pawelzik, E. (2019). Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiologia Plantarum*, *166*(4), 921-935.

Lichtenthaler, H.K., & Babani, F. (2022). Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids (a+b)/(x+c) in C4 plants as compared to C3 plants. *Photosynthetica*, *60*(1), 3-9.

Malik, G.C., & Ghosh, D.C. (2002). Effect of fertility level, plant density and variety on growth and productivity of potato. In *Potato-Global Research and Development*, *2*, 866-871.

Ministry of Agriculture (2023). Agricultural Statistics - Crops. Published July 24, 2023.

Moinuddin, Singh, K., & Bansal, S. K. (2005). Growth, yield, and economics of potato in relation to progressive application of potassium fertilizer. *Journal of Plant Nutrition*, *28*(1), 183-200.

OpenWeatherMap. (2021). Weather API. Retrieved from https://openweathermap.org/api.

Sarwar, M., Saleem, M.F., Maqsood, H., Ullah, N., Khan, A., Waqas, M., ... & Shuang, Y. (2022). Strengthening leaf physiological functioning and grain yield formation in heat-stressed wheat through potassium application. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1005773.

Singh, S.K., & Lal, S.S. (2012). Effect of potassium nutrition on potato yield, quality and nutrient use efficiency under varied levels of nitrogen application. *Potato Journal*, *39*(2).

Stark, J.C., Love, S.L., & Knowles, N.R. (2020). Tuber quality. *Potato Production Systems*, 479-497.

Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., Sathuvalli, V., Charlton, B., & Loka, D.A. (2021). Potassium: A vital macronutrient in potato production: A review. *Agronomy*, *11*(3), 543.

Vangelisti, A., Guidi, L., Cavallini, A., Natali, L., Lo Piccolo, E., Landi, M., ..., & Giordani, T. (2020). Red versus green leaves: Transcriptomic comparison of foliar senescence between two *Prunus cerasifera* genotypes. *Scientific Reports*, *10*(1), 1959.

Wang, J., Zhu, G., Dong, Y., Zhang, H., Rengel, Z., Ai, Y., & Zhang, Y. (2018). Potassium starvation affects biomass partitioning and sink–source responses in three sweet potato genotypes with contrasting potassium-use efficiency. *Crop and Pasture Science*, *69*(5), 506-514.

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(4), 7370-7390.

Waxman, A.M. (2017). *Effects of Harvest Date and Storage Duration on End-Product Quality of Three Processing Potato Varieties*. Ph.D. Thesis. Faculty of Agriculture Idaho University, United States.

Westermann, D.T., James, D.W., Tindall, T.A., & Hurst, R.L. (1994). Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: Sugars and starch. *American Potato Journal*, *71*, 433-453.

Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian, G., ..., & Jiang, Y. (2020). Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 904.

Yamaguchi, K., Mori, H., & Nishimura, M. (1995). A novel isoenzyme of ascorbate peroxidase localized on glyoxysomal and leaf peroxisomal membranes in pumpkin. *Plant and Cell Physiology*, *36*(6), 1157-1162.

Yang, X., Li, C., Zhang, Q., Liu, Z., Geng, J., & Zhang, M. (2017). Effects of polymer-coated potassium chloride on cotton yield, leaf senescence and soil potassium. *Field Crops Research*, *212*, 145-152.

Zhao, W., Zhao, H., Wang, H., & He, Y. (2022). Research progress on the relationship between leaf senescence and quality, yield and stress resistance in horticultural plants. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1044500.

Zhao, Y.Q., Zhang, Z.W., Chen, Y.E., Ding, C.B., Yuan, S., Reiter, R.J., & Yuan, M. (2021). Melatonin: A potential agent in delaying leaf senescence. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *40*(1), 1-22.